一种内置永磁四极透镜的 IH-DTL 的束流动力学设计

张博[1,2]，杨尧[1,2]，唐煜[1,2]，翟雨晗[1,2]，赵环昱[1,2]

（1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学核科学与技术学院，北京 100049）

摘要: 基于 KONUS 束流动力学方案，完成了一台内置永磁四极透镜的紧凑型 IH-DTL 的束流动力学设计。该 DTL 内置两组永磁四极透镜，共 37 个加速单元，可将流强为 20 emA 的 C^{6+}离子束从 0.5 MeV/u 加速至 4 MeV/u。在设计过程中，为了控制强流离子束在低能段的横纵向发射度增长，对加速间隙的电压、0 度参考粒子的能量及相位设置、四极磁铁参数和束流注入相位设置进行着重优化。最终该 IH-DTL 的横向归一化 RMS 接受度达到 0.37 πmm·mrad，束流传输效率在 95 %以上。

关键词: IH-DTL；KONUS；永磁四极透镜

中图分类号: TL56　**文献标志码:** A　**doi:**

1 引言

激光离子源（LIS）可以提供极高电流强度（10-100 mA）的短脉冲（脉冲持续时间为亚 μs 至 10μs）高电荷态重离子束，尤其在难熔金属离子的产生方面具有明显优势[1]。基于激光离子源的直线加速器可作为未来医用碳离子治疗装置[2]、大型重离子同步加速器[3]、自准直准单能高通量中子源等装置[4]的注入器。以在医用碳离子治疗装置中的应用为例，由于激光离子源能够产生脉冲流强高达 20 emA, 脉冲宽度为 3 μs 的 C^{6+}离子束[5]，结合直线加速器作为医用同步加速器的注入器[6]，可以实现同步加速器的单次单圈注入模式。与传统采用 ECR 离子源的注入器（提供 C^{4+}或 C^{5+}离子束）通过剥离注入同步环的方案相比[7,8]，不仅注入器更加紧凑，还可以大大降低束流往同步环中注入时的损失，减小束流损失对环境产生的放射性污染。

基金项目: 国家自然科学基金委资助项目（11722547）；中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDB-SSW-SLH041)

作者简介: 张博(1998—), 男(汉族), 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 从事基于激光离子源的直线加速器研究； E-mail: zhangbo@impcas.ac.cn

通信作者: 赵环昱，女，研究员，E-mail：zhaohy@impcas.ac.cn

一般医用碳离子治疗装置的同步加速器要求注入能量为几 MeV/u，例如，日本 HIMAC 同步加速器注入能量为 4 MeV/u[9], 德国 HIT 和中国 HIMM 的同步加速器注入能量为 7 MeV/u[10, 11]。这类直线注入器主要由离子源、RFQ 和 DTL 三部分组成，其引出流强通常为 200 -400 eμA，例如 HIMAC 中的 IH-APF DTL 引出流强为 380 eμA [12]，HIT 中 IH-KONUS DTL 引出流强为 115 eμA [13],HIMM 中回旋加速器的引出流强仅为 10 eμA [14]。本文以激光离子源应用于碳离子治疗装置为背景，给出了一种注入流强在 10 emA 以上的紧凑型 DTL 的束流动力学设计。由于激光离子源产生的 C^{6+}不需要在中能束运线进行剥离，因此可以通过二极磁铁的最低可靠磁感强度来确定同步储存环的注入能量，即 DTL 的输出能量。理论上二极磁铁的最低磁感强度可以低至 0.1 T，即对应注入能量 2 MeV/u，但是考虑到电源的稳定性和可靠性，将同步储存环的注入能量设定在 4 MeV/u，对应二极铁磁感应强度 0.144 T。假定 4 MeV/u 的 C^{6+}，对应相对论因子 β=0.0924，在同步储存环中运行一圈需要 2.03 μs。根据 HIMM 的设计要求，环上累积粒子数应大于 10^9。目前，在直接等离子注入方案的相关实验中，RFQ 出口 C^{6+}的峰值流强约为 10 emA，束流脉宽小于 2 μ s[15, 16]，单脉冲 C^{6+} 粒子数约为 4×10^9 。假定注入效率为 40%，俘获效率为 80%，加速效率也为 80% [6]，DTL 出口 C^{6+} 应大于 4×10^9 。考虑到 DTL、MEBT 中束流会继续损失，在本文中将 DTL 的设计流强定为 20 emA。在此基础上，进行了强流 IH-DTL 的束流动力学设计，其能量范围设置为 0.5-4 MeV/u。该 DTL 设计采用 KONUS（Kombinierte Null Grad Struktur-0 度组合结构）动力学方案[17-19]，主要参数如表 1 所示。

表 1　　IH-DTL 主要参数

参数	数值
加速粒子种类	C^{6+}
工作频率	162.5 MHz
加速模式	π 模
能量范围	0.5-4 MeV/u
束流流强设计值	20 emA
占空比	0.1 %
横向归一化 RMS 接受度	0.37 π mm·mrad
纵向 RMS 接受度	36.7 πkeV/u·Deg
传输效率	> 95%
长度	2.83 m

2　IH-DTL 束流动力学设计

2.1　KONUS 束流动力学

在低 β 段（β<0.1），IH-DTL 具有极高的分路阻抗[20, 21]。IH-DTL 的束流动力学方案主

要分为 KONUS 和 APF（Alternative Phase Focusing-交替相位聚焦）[22]，与 APF 相比，KONUS 束流动力学方案能够提供较强的横纵向聚焦作用，可以用于加速强流离子束。KONUS 束流动力学方案一般由多个周期性的结构组成。一个 KONUS 周期可以分为横向聚焦段（一般由四极磁铁构成）、纵向聚束段（一般由若干个负相位的加速间隙构成）和 0 度加速段三个部分。在直线加速器中，同步粒子的相位为 0 度时将具有最大的动能增益，但稳定的相位范围变为零。当束团中心粒子相位以正值注入时，束团在径向受到聚焦作用，在纵向受到散束作用， 束团的能量增益小于 0 度同步粒子。如果注入能量略高于 0 度同步粒子，束团将比 RF 场略早到达加速间隙，即束团的中心相位逐渐从正相移动到负相。因此，径向受到的作用从聚焦转向散焦，同时纵向受到的作用从散束转向聚束。一般设置多个 0 度同步相位单元，直至累积的径向散焦需要通过横向聚焦段补偿。横向聚焦段通常由一组三重四极透镜构成。在横向聚焦之后，束流的相宽增大，因此需要继续设置若干个负相位间隙作为纵向聚束段来控制束流的相宽，然后进入下一个 KONUS 周期。这种方案可以有效控制强流离子束在加速过程中的束流发射度增长。

KONUS 束流动力学由于其复杂性，不能通过解析公式方便的表示其规律，所以法兰克福大学（Goethe University Frankfurt）专门开发了 LORASR 程序[23]用于 KONUS 束流动力学的计算。在 LORASR 中，先设置 0 度同步粒子的相位和能量、有效加速电压以生成相应的 KONUS 型 DTL 结构，再利用该结构完成对给定参数束流的加速模拟。

2.2 IH-DTL 束流动力学设计

该 IH-DTL 共由三组 KONUS 结构组成，其中第一组 KONUS 的横向聚焦四极磁铁置于 DTL 外部，剩余两组四极磁铁置于 DTL 内部，如图 1 所示。为了节约直线注入器的成本，在 RFQ 和 DTL 中间省去了聚束器。

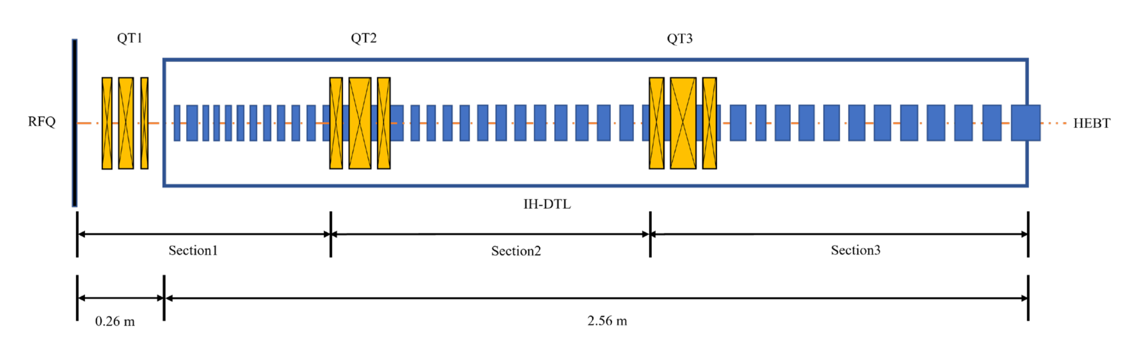


图 1（在线彩图）紧凑型直线加速器的结构示意图

DTL 各个加速间隙束心粒子和同步粒子的能量差与相位差（记束心粒子"c"，同步粒子为"s"）如图 2 所示。 传统的负同步相位部分需要在零度部分（图 2，位置"a"）之前使束团在纵向受到聚束作用。 当粒子通过 0 度部分的第一个间隙（图 2，位置"b"，"d"和"f"）时，束团中心粒子的相位为正，束团在径向受到聚焦作用，在纵向受到散束作用。 束团中心粒子能量大于 0 度同步粒子的能量， 因此束团将比 RF 功率略早到达加速间隙。此时束团中心粒子的相位逐渐从正相位移动到负相位。在出口处（图 2，位置"c"，"e"和"g"），束团在纵向受到聚束作用，在径向受到散焦作用。

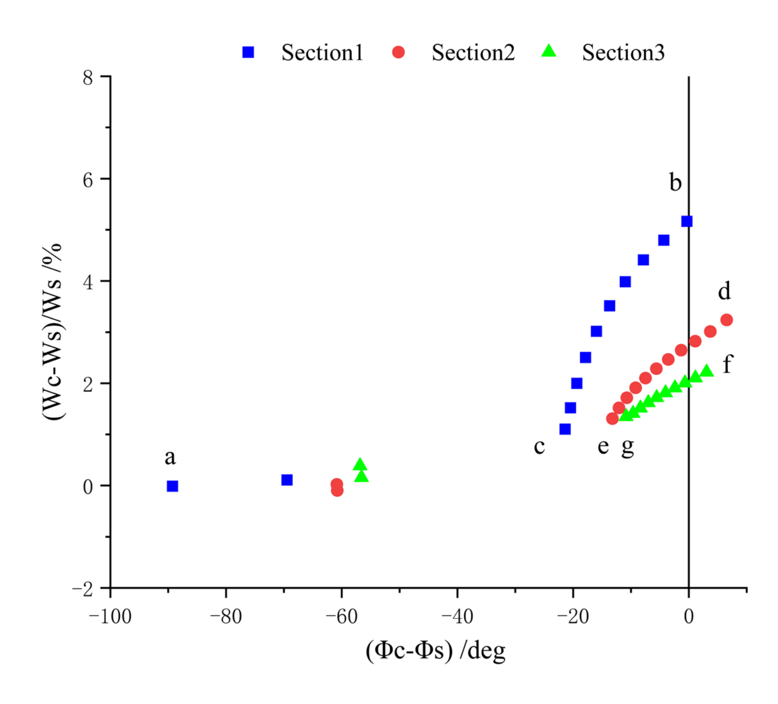


图 2（在线彩图）每个间隙束心粒子的能量和相位与 0 度同步粒子的偏差

图 3 和图 4 分别为横向束流包络和纵向束流包络，其中束流设计流强为 20.0 emA。由于该强流直线注入器的设计流强大于 5 emA，注入方式为单次单圈注入，不需要使用多圈注入、剥离注入等方式累积束流， 因此该 IH-DTL 出口束流的横向发射度只需要小于同步加速器接受度即可。在本文的 IH-DTL 束流动力学设计中，影响发射度优化的主要原因为：1）束流流强为 20 emA，与束流流强较低的情形相比，空间电荷效应对横纵向发射度的影响更加明显（如图 5)；2）出于装置紧凑的考虑，省略了 RFQ 与 DTL 之间的聚束器，这会导致 DTL 入口处的束流处于纵向发散的状态（如图 4)，因此在 DTL 的开始阶段需要设置更多的负相位聚束间隙用于控制束流的纵向发射度，这又会导致束流横向发射度明显增长。由于经过优化，该 IH-DTL 99 %束流横向发射度为 3.83 πmm·mrad，小于同步加速器的单次单圈注入要求的 13 πmm·mrad[6]，满足同步加速器单次单圈的注入要求。

图 6 为 IH-DTL 的入口和出口束流相空间分布，其中中 IH-DTL 出口束流的纵向相空间分布存在较长的拖尾，原因是在 KONUS 方案中，0 度加速段中的束流相稳定区长度为 0，束流在加速过程中不可避免的会受到非线性力的作用，导致束团在纵向相空间的分布发生畸变。

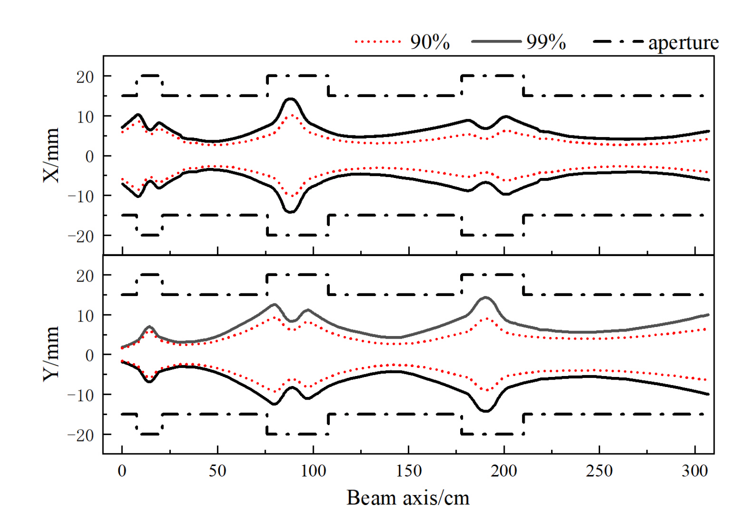


图 3（在线彩图）99 %和 90 %横向束流包络

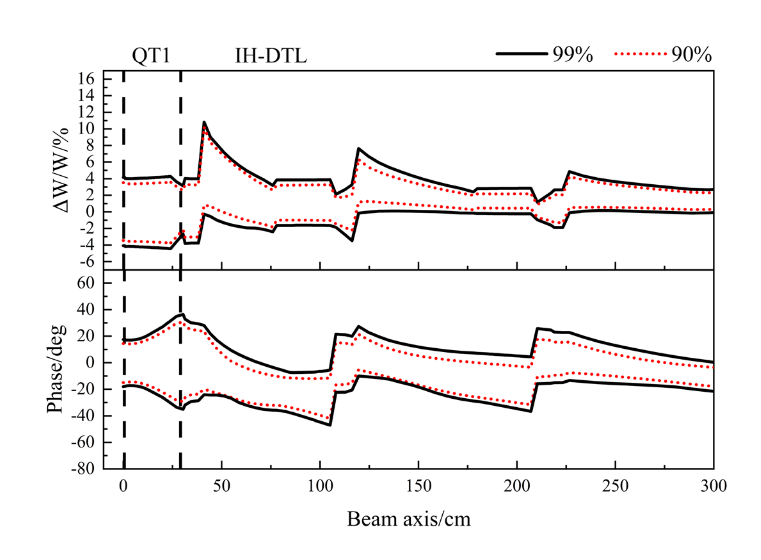


图 4（在线彩图）99 %和 90 %纵向束流包络

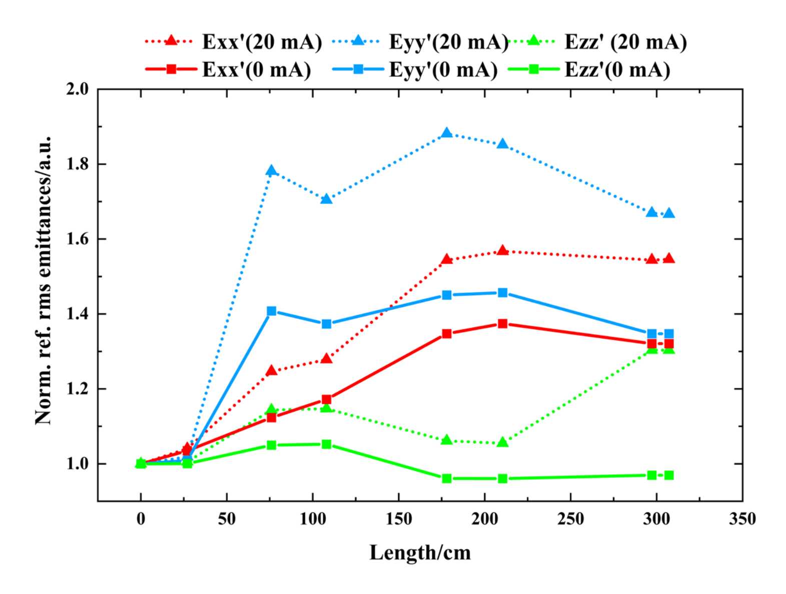


图 5 （在线彩图）束流归一化 rms 发射度增长

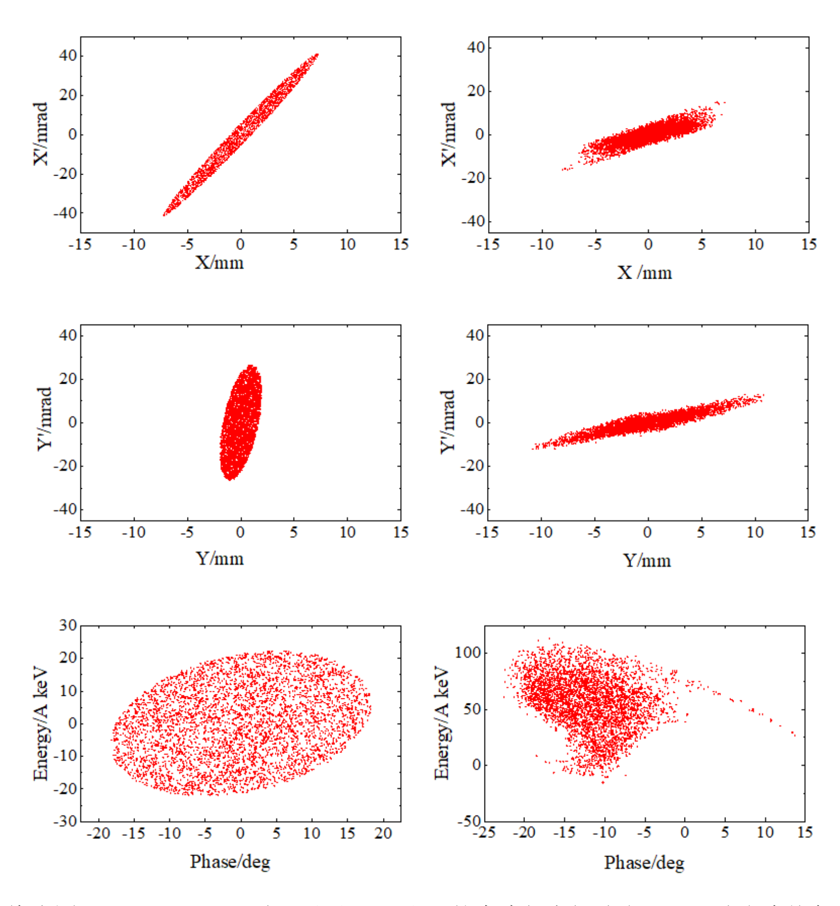


图 6 （在线彩图）IH-DTL 入口（左）和出口（右）的束流相空间分布（入口分布为均匀分布）

3 主要参数设置讨论

3.1 加速梯度设置

图 7 给出了动力学设计完成后 IH-DTL 中每个加速间隙的间隙电压和沿轴最大间隙电

场。间隙电压从低能量端的 100 kV 到高能量端的 317 kV。由于 IH-DTL 中相邻漂移管分别位于正负电势，而腔体两端位于 0 电势，因此在 IH-DTL 中端部间隙电压为相邻间隙电压的一半[24]。通过对 DTL 间隙电压进行优化，整个 DTL 的沿轴最大间隙电场基本一致，最大沿轴间隙电场为 9.86 MV/m。

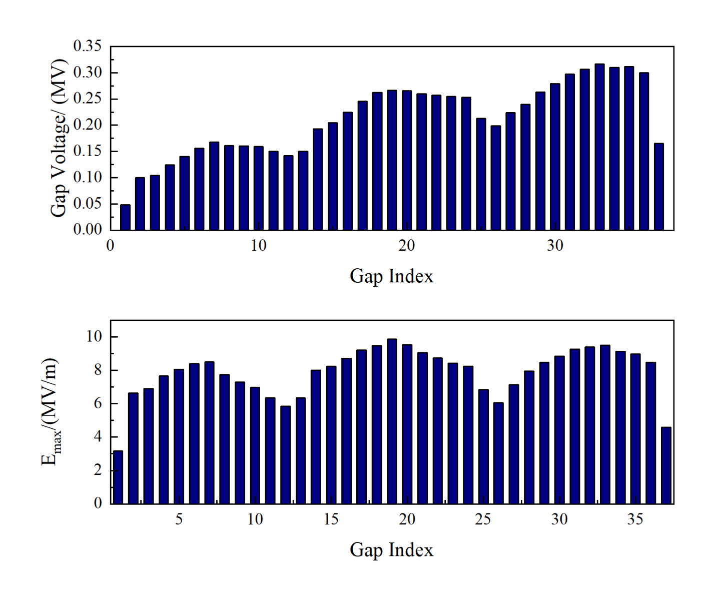


图 7 （在线彩图）沿轴间隙电压及最大间隙电场分布

3.2 四极磁铁设置

在束流通过四极磁铁时，束团在纵向上受到的影响与束流通过漂移管时基本一致且需要尽可能短，因此需要使用长度短且磁场梯度高的四极磁铁。在其他参数不变的情形下，四极磁铁外径越大则磁场梯度越高。考虑到 162.5 MHz 的 DTL 腔体内径有限，且 IH-DTL 的 T 型板需要占用一定的空间，最终将 IH-DTL 腔体内磁铁的外径设置为 6 cm。使用 OPERA 对 DTL 腔内的两组永磁四极铁磁铁 QT2 与 QT3 进行仿真[25]，得到四极磁铁腔内永磁铁的磁场梯度及径向磁场分布如图 8、图 9，参数见表 3。

表 3 永磁四极三重透镜参数

永磁四极磁铁	QT2	QT3
漂移管长度(cm)	23.62	22.99
磁场梯度(T/m)	60/60/60	60/60/60
有效长度(cm)	5/7.9/4.4	4.5/8.9/5.5
内径（cm）	3.0	3.0
外径（cm）	6	6

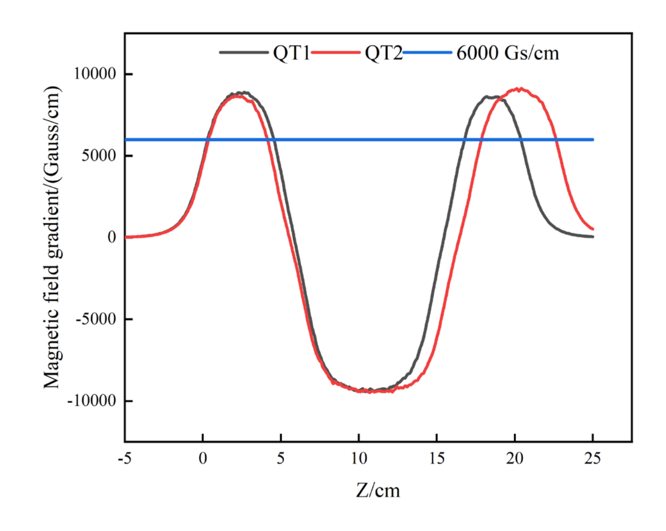


图 8 （在线彩图）四极永磁铁磁场梯度（材料：NdFeB，材料牌号：N48M）

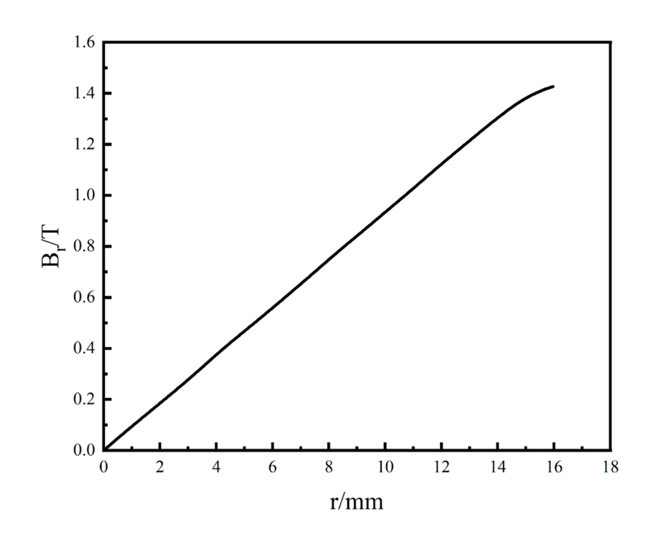


图 9 （在线彩图）四极永磁铁径向磁场分布

4 多粒子模拟

根据 LORASR 给出的 DTL 结构参数，进行高频腔体设计。得到 DTL 内的三维射频电场分布，其沿 DTL 中心轴线的分布如图 10。每个加速单元的有效积分电压与动力学设计要求的电压相比误差不超过 1%，如图 11 所示。为了更好的反应该 IH-DTL 的性能，将射频电场与四极磁铁磁场导入 Tracewin 进行多粒子模拟。

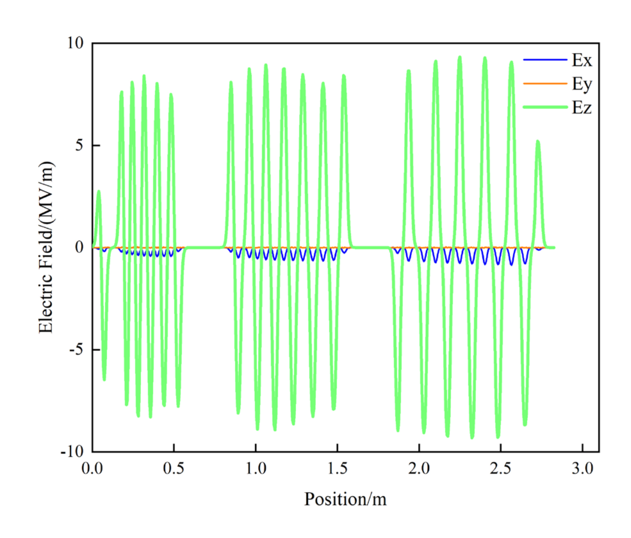


图 10 （在线彩图）沿轴三维射频电场分布



图 11 （在线彩图）IH-DTL 加速单元电压积分值（CST）与束流动力学设计值（LORASR）的误差

IH-DTL 由于支撑结构是非对称的，间隙电场会产生垂直二极场，使束流中心在垂直方向产生偏移（图 9），使用非对称的漂移管结构可部分消除二极场，但漂移管上的电容分布会增加，导致腔体所需功率增大[21, 24, 26]。经过优化，束流中心的横向位置偏移小于 0.05 mm，如图 12 所示。

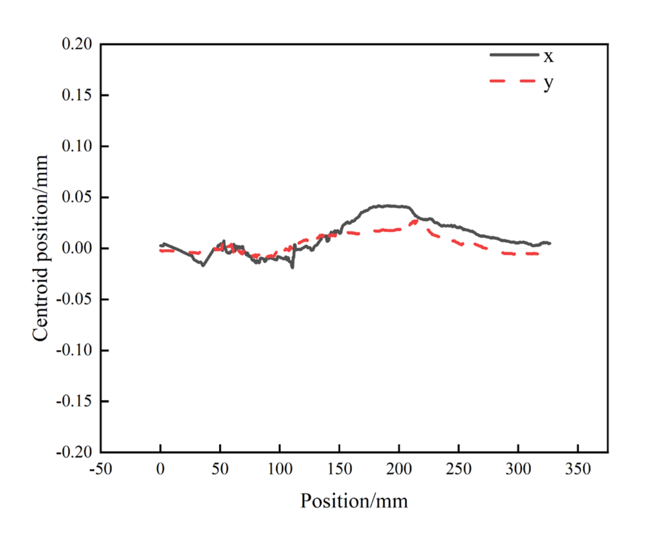


图 12 （在线彩图）束流中心位置偏移

最终输出束流相空间分布与横向束流密度如图 13 所示。输入束流与输出束流的 twiss 参数及 99 %归一化束流发射度见表 2，其中 99 %束流横向发射度为 3.83 πmm·mrad，小于同步加速器的单次单圈注入要求的 13 πmm·mrad[6]。IH-DTL 的横纵向 rms 发射度增长达到 1.5 倍（图 14）。该 IH-DTL 的束流传输效率达到 98.5 %，如图 15 所示。以上模拟结果与 LORASR 的计算结果基本一致，验证了 LORASR 所做的动力学设计具有一定的可靠性。

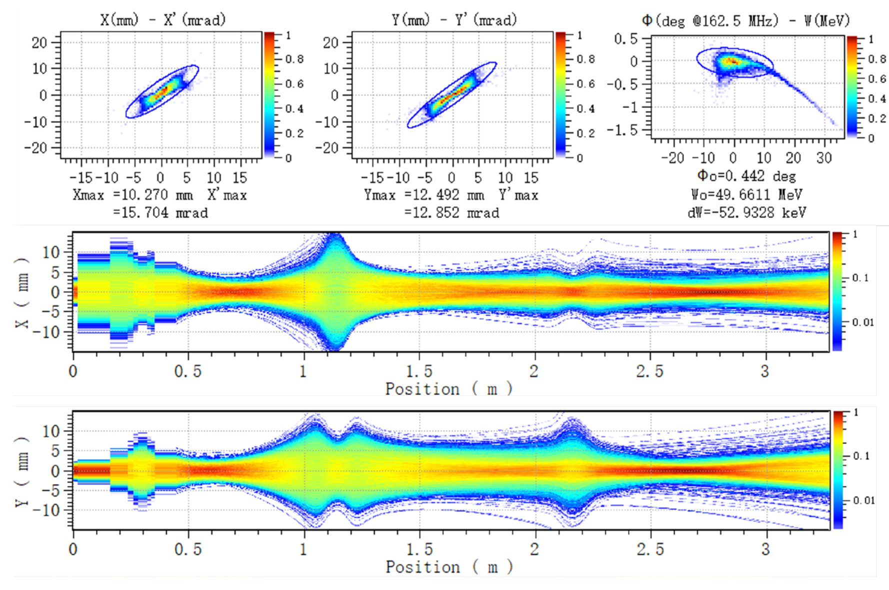


图 13 （在线彩图）基于射频场图的 IH-DTL 出口处的波束分布和横向包络

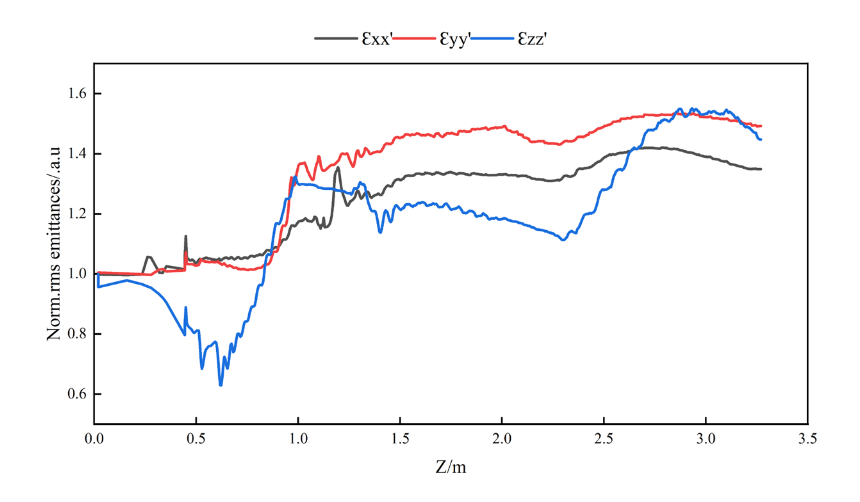


图 14 （在线彩图）束流归一化 rms 发射度增长

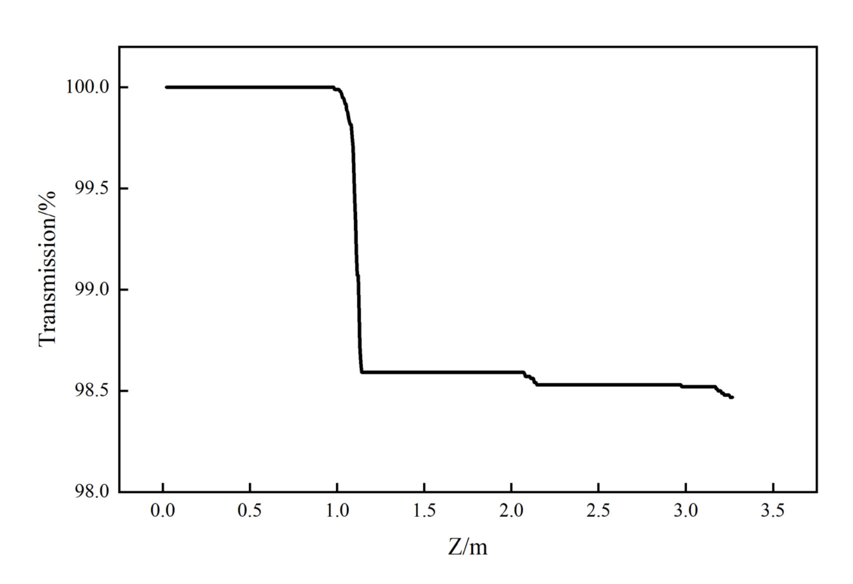


图 15 （在线彩图）IH-DTL 中的束流传输效率

表 2 IH-DTL 入口和出口的束流相空间参数

入口 Twiss 参数	α	β	Norm.Emittance[99 %]
x	-8.92	1.92 mm/(π·mrad)	1.38π mm·mrad
y	-1.28	0.16 mm/(π·mrad)	1.45π mm·mrad
z	-0.03	66.21 deg/(π·MeV)	4.58π MeV·deg
出口 Twiss 参数	α	β	Emittance[rms]
x	-1.77	1.43 mm/(π·mrad)	3.30π mm·mrad
y	-2.81	2.07 mm/(π·mrad)	3.83π mm·mrad
z	0.37	37.70 deg/(π·MeV)	11.05π MeV·deg

5 结论

用于加速流强在 10 emA 以上 C^{6+} 到 4 MeV/u 的 KONUS 型 IH-DTL 的束流动力学设计已经完成。该 IH-DTL 由 37 个加速单元、两组内置永磁四极透镜和一组外置永磁四极透镜构成。初步动力学设计由 LORASR 完成，并进行了相应的腔体电磁设计。该 IH-DTL 的平

均加速梯度为 2.47 MV/m，腔内设置的永磁四极铁的磁场梯度为 60 T/m，纵向归一化 RMS 接受度达到 36.7π keV/u·Deg。通过多粒子仿真得到 IH-DTL 引出束的流强在 10 emA 以上，99 %横向归一化发射度小于 13π mm·mrad, 满足同步环的单圈注入要求。

参考文献:

[1] HASEROTH H, KUGLER H, LANGBEIN K, et al. Developments at the CERN laser ion source [J]. Review of scientific instruments, 1998, 69(2): 1051-3. doi:10.1063/1.1148630.

[2] Fournier P , Gre?Goire G , Kugler H ,et al.Status of the CO2 laser ion source at CERN[J].Review of Scientific Instruments, 2000, 71(2):924-926.doi:10.1063/1.1150347.

[3] SHARKOV B Y, KONDRASHEV S, ROUDSKOY I, et al. Laser ion source for heavy ion synchrotrons [J]. Review of scientific instruments, 1998, 69(2): 1035-9.doi: 10.1063/1.1148531.

[4] IKEDA S, OKAMURA M, KANESUE T, et al. Neutron generator based on intense lithium beam driver [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(2): 023304.doi: DOI:10.1063/1.5128421.

[5] ZHAO H, ZHANG J, JIN Q, et al. New development of laser ion source for highly charged ion beam production at Institute of Modern Physics [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 02A917.doi: 10.1063/1.4937115.

[6] 谢修璀. 医用重离子加速器 HIMM 注入方案的设计研究 [D]; 中国科学院研究生院（近代物理研究所）, 2014.

[7] MARTI F. Heavy ion strippers [J]. LINAC2012, FR1A01, 2012.

[8] NOLEN J A, MARTI F. Charge strippers of heavy ions for high intensity accelerators [J]. Reviews of Accelerator Science and Technology,2013,6:221-36.doi: 10.1142/s1793626813300107.

[9] IWATA Y, YAMADA S, MURAKAMI T, et al. Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 569(3): 685-96.doi: 10.1016/j.nima.2006.09.057

[10] WANG B, HAO H, VOROZHTSOV S, et al. Computer design of a compact cyclotron [J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2012, 9(3): 288-98.

[11] SCHLITT B. Commissioning and Operation of the injector linacs for HIT and CNAO [J]. Proc LINAC08, 2008: 720.

[12] IWATA Y, YAMADA S, MURAKAMI T, et al. Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators [J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 2007, 572(3): 1007-21.doi: 10.1016/j.nima.2007.01.012

[13] VORMANN H, SCHLITT B, CLEMENTE G, et al. Status of the Linac Components for the Italian Hadrontherapy Centre CNAO [J]. 2008.doi: http://dx.doi.org/

[14] BING, WANG, HUANFENG, et al. Computer design of a compact cyclotron [J]. Physics of Particles & Nuclei Letters, 2012.doi: 10.1134/S1547477112030053

[15] SAKO T, YAMAGUCHI A, SATO K, et al. Development of C6+ laser ion source and RFQ linac for carbon ion radiotherapy [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 87(2).doi: 10.1063/1.4935975

[16] 张博. 基于激光离子源的紧凑型注入器的实验研究及其 DTL 设计 [D]; 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2022.

[17] RATZINGER U, TIEDE R. Status of the HIIF RF linac study based on H-mode cavities [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1998, 415(1-2): 229-35.doi: 10.1016/S0168-9002(98)00389-1

[18] RATZINGER U. Effiziente Hochfrequenz-Linearbeschleuniger für leichte und schwere Ionen [D], 1998.

[19] RATZINGER U, HäHNEL H, TIEDE R, et al. Combined zero degree structure beam dynamics and applications [J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2019, 22(11): 114801.doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.114801

[20] BLEWETT M H. CERN Symposium on High-Energy Accelerators and Pion Physics [J]. Physics Today, 1956, 9(11): 18.doi: 10.1063/1.3059815

[21] RATZINGER U. H-type linac structures [J]. 2005.doi: 10.5170/CERN-2005-003.351

[22] GOOD M L. PHASE-REVERSAL FOCUSSING IN LINEAR ACCELERATORS [J]. 1952.

[23] TIEDE R, SAUER A C, PODLECH H, et al. LORASR code development [R], 2006

[24] DU Heng, YUAN Youjin, YIN Xuejun, et al. Design of a 4 MeV/u IH-DTL Injector for Cancer Therapy[J]. Nuclear Physics Review, 2018, 35(1): 34-39.(in Chinese). doi: 10.11804/NuclPhysRev.35.01.034

(杜衡, 原有进, 殷学军, et al. 重离子治癌装置 4 MeV/u IH 型漂移管直线注入器的动力学设计 [J]. 原子核物理评论, 2018, 35(01): 34-9. doi: 10.11804/NuclPhysRev.35.01.034.)

[25] COLMAN J. POISSON, SUPERFISH. POISSON, SUPERFISH, Magnet and RF Cavity Design [R]: Brookhaven National Lab.(BNL), Upton, NY (United States), 1992.

[26] TANG R, XING Q, ZHENG S, et al. IH-DTL design with modified KONUS beam dynamics for a synchrotron-based proton therapy system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 920: 50-7.doi: 10.1016/j.nima.2018.10.125

Beam dynamic design of IH-DTL with built-in permanent magnet quadrupole lens

ZHANG Bo[1,2], YANG Yao[1,2], TANG Yu[1,2], ZHAI Yuhan[1,2], ZHAO Huanyu[1,2]

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on KONUS dynamics, the beam dynamic design of a compact IH-DTL with built-in permanent magnet quadrupole lens was completed. The DTL is comprised by 37 acceleration gaps and two sets of permanent magnet quadrupole lenses, which can accelerate C^{6+} ion beam of 20 emA from 0.5 MeV/u to 4 MeV/u. To control the transverse and longitudinal emittance growth of the low-energy heavy ion beams, the gap voltage, injection phase, magnet parameters, and energy and phase settings of the 0-degree reference particles have been optimized so that the transverse normalized RMS acceptance of the IH-DTL reaches 0.37π mm·mrad, and the transmission efficiency is above 95%.

Key words: IH-DTL；KONUS；Permanent magnet quadrupole lens

1

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11722547); Key Program in Frontier Science of the Chinese Academy of Sciences(QYZDB-SSW-SLH041))

Corresponding author: ZHAO Huanyu, E-mail: zhaohy@impcas.ac.cn.